Potentialmessungen im elektrischen Nickellichtbogen.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

vorgelegt der

Hohen philosophischen Fakultät

der

Universität Basel

von

Wilhelm Frey
aus Binningen (Kt. Baselland)

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Leipzig
Verlag von Johann Ambrosius Barth
1916

Genehmigt von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der philosophischen Fakultät auf Antrag der Herren Professoren

Dr. A. Hagenbach und Dr. H. Veillon.

Basel, den 7. Dezember 1915.

Prof. Dr. Landmann,
Dekan.

Diese Arbeit erscheint gleichzeitig auch in den Annalen der Physik, Bd. 49. p. 937. 1916.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig. 172

Meinen lieben Eltern

aus Dankbarkeit gewidmet.

1. Einleitung.

Im Jahre 1904 veröffentlichte Arons[1]) eine Arbeit über den Metallichtbogen in Stickstoff und Sauerstoff. In derselben erwähnt er die große Schwierigkeit, die Funktionalbeziehung zwischen Bogenspannung und Stromstärke festzustellen, mit anderen Worten, (Volt-Ampère = V, i)-Kurven des Bogens aufzunehmen, infolge der Inkonstanz des Bogens. Gestützt auf einige Versuche am Silberbogen im Stickstoff, den er nie dauernd erhalten konnte, stellt sich Arons auf den Standpunkt, daß ein Bogen ohne chemische Reaktion überhaupt unmöglich sei. Dieser Standpunkt scheint nun allerdings keine Berechtigung mehr zu haben, nachdem uns der Quecksilberbogen im Vakuum, den Arons selbst entdeckte, eine Bogenentladung zeigt, bei der eine chemische Reaktion sowieso ausgeschlossen ist, da der Bogen im Vakuum durch den Quecksilberdampf selber gebildet wird.

Die Inkonstanz des Bogens bei Arons ist eher auf die zu geringe Klemmenspannung der Stromquelle zurückzuführen, die er zu seinen Untersuchungen am Bogen anwandte. Von dieser und der mit ihr in funktioneller Beziehung stehenden Minimalstromstärke hängt nach der Theorie von Kaufmann[2]) und Stark[3]) die Stabilität des Bogens wesentlich ab. Von geringerem, immerhin noch ganz beträchtlichem Einfluß auf die Stabilität des Bogens ist die Wärmeleitfähigkeit der Elektroden und des den Bogen einschließenden Gases; denn je geringer dieselbe ist, um so ruhiger brennt auch der Bogen. Diese Behauptungen werden gestützt durch die Resultate der

---

1) L. Arons, Ann. d. Phys. **1.** p. 700. 1914.
2) W. Kaufmann, Ann. d. Phys. **2.** p. 158. 1900.
3) J. Stark, Ann. d. Phys. **12.** p. 673. 1903.

neulich erschienenen Untersuchungen von Grotrian[1]), der selbst in einer Wasserstoffatmosphäre (V, i)-Kurven eines 5 cm langen Bogens aufnehmen konnte. Er benutzte dazu allerdings eine Stromquelle von einigen tausend Volt, während Arons[2]) nur eine solche von 110 Volt zur Verfügung stand.

Aus den vielen Untersuchungen über den Metallichtbogen geht deutlich der große Einfluß hervor, den die den Bogen einschließende Gasatmosphäre auf die Form des Bogens und seine elektrischen Eigenschaften ausübt. Einen besonders großen Einfluß schrieb man von jeher dem Sauerstoff zu. So vertreten einige Forscher, darunter Frau H. Ayrton[3]) und Lehmann[4]), den Standpunkt, daß das Zustandekommen des Zischbogens in einem Oxydationsvorgang seine Ursache habe.

Diese Annahme findet ihre Bestätigung in der Arbeit von Hagenbach und Veillon[5]), in welcher der Metallbogen für Eisen und Kupfer in verschiedenen Gasen optisch und elektrisch untersucht wurde. Dabei stellte sich heraus, daß das Zustandekommen der Zischformen seine Ursache lediglich in der Oxydation der Kathode findet. E. Banderet[6]) hat in seiner Dissertation die Messungen der beiden obigen Forscher ergänzend fortgesetzt, indem er die Messung von Anoden- und Kathodenfall für die verschiedenen Formen des Eisen- und Kupferbogens zum Gegenstand seiner Untersuchung wählte. Auf Anregung von Hrn. Prof. Hagenbach[7]) habe ich es unternommen, den Bogen unter möglichster Vermeidung von Oxydationsvorgängen zu untersuchen. Dies kann auf zwei Wegen geschehen: entweder durch Anwendung eines sehr wenig oxydierbaren Metalles oder durch Einschluß des Bogens in ein sauerstoffreies Gas. Ich beschritt beide Wege und wählte seiner scheinbar geringen Oxydierbarkeit wegen das Nickel, während ich den Bogen unter den ver-

1) W. Grotrian, Ann. d. Phys. **47.** p. 141. 1915.

2) L. Arons, l. c.

3) Hertha Ayrton, The electric arc. London 1902.

4) O. Lehmann, Ann. d. Phys. **55.** p. 361. 1895.

5) A. Hagenbach u. H. Veillon, Physik. Zeitschr. **11.** p. 833. 1910.

6) E. Banderet, Diss. Basel 1912.

7) A. Hagenbach u. W. Frey, Archives des sciences phys. et nat. **38.** p. 229. 1914.

schiedensten Bedingungen in einer Stickstoffatmosphäre brennen ließ. Für diese Untersuchungen stellte ich mir folgendes Programm auf. Es sollen untersucht bzw. gemessen werden:

1. Die Bogenspannung, Anoden- und Kathodenfall, das Gefälle im Bogen, alle als Funktion des Gasdruckes.
2. Die Bogenspannung, Anoden- und Kathodenfall, das Gefälle im Bogen, alle als Funktion der Bogenlänge.
3. Die Bogenspannung, Anoden- und Kathodenfall, das Gefälle im Bogen, alle als Funktion der Stromstärke.
4. Die Bogenspannung, Anoden- und Kathodenfall, das Gefälle im Bogen, alle als Funktion der Zeit (Temperatur).
5. Der Übergang von einer Form in die andere auf der Widerstandslinie.

Leider war es mir nicht vergönnt, das Programm so erschöpfend durchzuarbeiten, wie ich es mir vorgenommen hatte. Entweder konnte die gewünschte Bogenform, wenn sie für eine Messung erscheinen sollte, überhaupt nicht erhalten werden, oder wenn sie dann einmal erschien, so war die Zeit ihres Bestehens nur so kurz, oder die Bogenform selbst so schlecht ausgebildet, daß an eine Messung nicht zu denken war. Näher soll auf die experimentellen Schwierigkeiten in den entsprechenden Kapiteln eingegangen werden. Immerhin habe ich mich bemüht, so viele diskutable Messungen durchzuführen, daß deren eingehende Behandlung an dieser Stelle dennoch gerechtfertigt erscheint.

2. Beschreibung der Bogenformen. Photographische Aufnahmen derselben.

Obschon die oben erwähnten Arbeiten von Hagenbach und Veillon[1]), Hagenbach[2]) und Banderet[3]) eine genaue Beschreibung der Formen des Kupfer- und Eisenbogens mit Zeichnungen enthalten, finde ich es dennoch angezeigt, auch die Bogenformen des Nickels einer rein äußerlichen Untersuchung zu unterziehen. Da ich wegen der relativ starken Oxydation des Nickels die Großzahl meiner Messungen in Stickstoff ausführte, so beziehen sich auch die folgenden Be-

1) A. Hagenbach u. H. Veillon, l. c.
2) A. Hagenbach, Phys. Zeitschr. **10.** p. 649. 1909.
3) E. Banderet, l. c.

schreibungen auf den Bogen in diesem Gas. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß ich zwischen den Formen in Luft und denjenigen in Stickstoff äußerlich keinen Unterschied wahrnehmen konnte.

Mit Ausnahme desjenigen Falles, wo der Bogen in Luft bei Atmosphärendruck brannte, erhielt ich fast ausnahmslos nur die Formen 1, 2 und 3 nach der Bezeichnung von Hagenbach und Veillon[1]), wie verschieden ich auch die Versuchsbedingungen wählte. Die Zischformen waren sehr selten und nur an einem raschen Aufblitzen erkenntlich. In Luft bei Atmosphärendruck trat zwar Form 3a, vielleicht 3b, auf. Der Bogen glich dabei eher einer großen, in der grünen Farbe des Nickeldampfes leuchtenden Flamme, in deren Aureole die Verbindung von Nickel und Sauerstoff vor sich ging. Die Bildung des Oxyds war so reichlich, daß ganze Wolken davon aufstiegen und sich auf dem Innern der Kesselwand als ziemlich dicke Schicht niederschlugen. Dabei brannte der Bogen so unruhig flackernd, daß an eine Messung nicht gedacht werden konnte. Bei näherem Zusehen stellte sich heraus, daß neben der voluminösen Verbindung, die sich an der Kathode und der Kesselwand niederschlug, noch eine zweite existierte, die sich als schwarzes festes Pulver an der Anode festsetzte.

Hr. Prof. Fichter hatte die Freundlichkeit, eine Analyse der beiden Verbindungen vorzunehmen. Diese ergab folgendes Resultat: 1. Der verhältnismäßig geringe, aber dichtere Niederschlag in Form eines schwarzen Pulvers auf der Anode ist Ni_2O_3. 2. Der in großer Menge gebildete, voluminöse, hellgrüne Niederschlag an der Kathode und der Kesselwand ist NiO.

Waren die Elektroden hochpoliert und noch ganz rein, so konnte bei jedem Druck und auch bei Anlegung von 440 Volt nicht gleich ein Bogen erhalten werden. Bei der Kontaktzündung, die übrigens bei allen Messungen angewandt wurde, erschien jeweils nur ein starker Funke, der auch bei großer Kontaktstromstärke gleich wieder erlosch. Erst nachdem das „Zünden" oft wiederholt worden war und sich auf den Elektrodenoberflächen ein kleiner Oxydfleck oder sonst eine kleine Unreinigkeit gebildet hatte, setzte endlich der Bogen ein und zwar bei einem Druck von 30 mm für kurze Zeit in der Form 1.

---

1) A. Hagenbach u. H. Veillon, l. c.

Dabei bedeckte sich die Anode mit dem bekannten, in der Farbe des Stickstoffes leuchtenden Glimmlichte, das nach unten scharf abschnitt. Bis zu einer Bogenlänge von 5 mm setzte der Bogen an der Kathode nicht in einer Spitze an, wie bei größeren Bogenlängen und reinen Elektroden, sondern der negative Bogenansatz, der in der grünen Farbe des Metalldampfes leuchtete, überdeckte eine bis 5 mm breite Fläche der Kathode.

Bei den Formen 1 und 2 beobachtete ich häufig eine Spaltung des Kathodenansatzes in zwei Äste, wobei der Zwischenraum der beiden geteilten Ansätze bis 6 mm betragen konnte. Der positive Ansatz blieb dabei unverändert. Diese Erscheinung ist nicht zu verwechseln mit derjenigen, wo der einfache Ansatz sehr oft seine Spur auf der Elektrodenoberfläche wechselte, so daß der Bogen auf der Elektrode zu tanzen schien. Diese letztere Erscheinung wurde auch schon von Hagenbach und Veillon[1]), Grotrian[2]) und anderen beobachtet.

Brannte Form 1 etwas längere Zeit und bei einer Stromstärke von 8 Amp., so traten folgende Veränderungen ein: Auf beiden Elektroden hatten sich dünne Oxydhäutchen gebildet. Vom Kathodenansatz ging ein Sprühregen feiner, glühender Partikelchen aus. Dieser war so intensiv, daß sich die glühenden Partikelchen scheinbar geradlinig bis an die Kesselwand bewegten und dort aufprallten. In dieser Erscheinung suchte ich auch die Erklärung dafür, daß der Bogen bei der Form 1 an die Kesselwand übersprang und ich durch die unten erwähnte Asbestfütterung abhelfen mußte.

Besonders merkwürdig war die Ansatzveränderung an der Anode. Der gleichmäßig über die Oberfläche verteilte Glimmansatz verwandelte sich in einen solchen, bei dem einzelne Punkte besonders hell leuchteten. Es waren das offenbar Punkte, wo ein kleines Oxydkörnchen lag, das eine lokale Vergrößerung der Stromdichte veranlaßte. Die ausgezeichneten Punkte lagen aber nicht regellos über der Oberfläche zerstreut, sondern nach einer bestimmten Ordnung gereiht, wenigstens am Rand, wo die Punkte, wohl infolge erhöhter Flächendichte, am zahlreichsten auftraten, und zwar so, daß die

1) A. Hagenbach u. H. Veillon, l. c.
2) W. Grotrian, l. c.

Zwischenräume überall gleich groß waren und der Rand deshalb in der Projektion abschattiert erschien. Nicht selten kam es vor, daß dieser Kranz von Punkten um den Winkel zweier Punkte rotierte, abwechselnd im einen und entgegengesetzten Sinne. Diese Erscheinung wurde von mir nicht näher verfolgt, jedoch schon früher von anderen Autoren, so von Hagenbach und Veillon[1]), Fabry und Buisson[2]) und auch von Cady[3]) beobachtet und von letzterem näher studiert[4]).

Der günstigste Gasdruck für das Zustandekommen der Form 2 lag zwischen 100 und 300 mm. Die Form 2 unterschied sich äußerlich von Form 1 dadurch, daß sie einen zusammengeschnürten Anodenansatz besaß. Auch war die Farbe desselben nicht bläulich wie bei Form 1, sondern dunkelpfirsichblütenrot. Von einem eigentlich genau definierbaren Anodenansatz der Form 2 konnte ich nie sprechen; vielmehr hing die Form desselben vom Gasdruck ab, bei dem der Bogen brannte; je höher der Druck, um so spitzer der Ansatz, je niedriger der Druck, um so breiter wurde auch der Ansatz, so daß er oft eine Fläche von mehreren Quadratmillimetern bedeckte (Figg. 2 und 3 der Tafel).

Oxydation der Elektroden, Steigerung des Gasdruckes über 300 mm und der Stromstärke begünstigten das Zustandekommen der Form 3. Bei ihr leuchtete der ganze Bogen, einschließlich dem Anodenansatz, in der grünen Farbe des Metalldampfes. Über die Form des Ansatzes gilt das für die Form 2 Gesagte. Immerhin bedeckte auch hier wie dort der Kathodenansatz eine viel größere Fläche der Elektrode als der positive Ansatz (Fig. 4 der Tafel).

Bei noch blanken, kalten Elektroden kam es häufig vor, daß bei einer angelegten Spannung von 440 Volt und niedrigem Gasdruck (15 mm) reine Glimmentladung einsetzte, wenn die Elektroden einander bis auf ca. 1 mm genähert wurden. Hatte es dann einmal eingesetzt, so konnte man die Elektroden auf eine Entfernung von über 1 cm auseinanderziehen,

---

1) A. Hagenbach u. H. Veillon, l. c.

2) Ch. Fabry u. H. Buisson, Journal de Phys. **4.** (9). p. 929. 1910.

3) W. G. Cady, Physik. Zeitschr. **14.** p. 296. 1913; **8.** p. 890. 1907; Phys. Rev. N. S. **2.** p. 249. 1913.

4) W. G. Cady, Phys. Rev. N. S. **2.** p. 249. 1913.

wobei die Vergrößerung des Elektrodenabstandes das gleichzeitige Wachsen der positiven Säule gut erkennen ließ. Ohne wahrnehmbaren äußeren Grund wechselte dieses Glimmlicht plötzlich mit Form 1, um ebenso unmotiviert wieder zu erscheinen. Dieses Hin- und Herpendeln zwischen den beiden Entladungsformen wiederholte sich sehr oft und veranlaßte mich dazu, diesen Übergang auch durch Messung der elektrischen Verhältnisse näher zu studieren (vgl. Kap. 6: Stabilität des Bogens).

Um die Elektroden von gebildetem Oxyd zu befreien, machte ich einmal den Versuch, den Bogen in einer Leuchtgasatmosphäre brennen zu lassen und so das Oxyd zu reduzieren. Das Experiment glückte allerdings nur insofern, als das Oxyd verschwand, dafür aber aus dem Leuchtgas dicke Schichten Ruß sich auf die Elektroden setzten. Dabei mußte der Druck unter 100 mm gehalten werden, um den Bogen zünden zu können. Bei diesem Reduktionsprozeß zeigte sich nun folgendes interessante Phänomen. Der Bogen brannte am ausgeschiedenen Ruß in einer mir für Metalle unbekannten Form, die ich in einigen photographischen Aufnahmen festhielt, von denen eine in Fig. 6 der Tafel wiedergegeben ist.

Diese Bogenform, die sowohl für Kohle als auch für Metalle von Hoerburger[1]), Pollack[2]), Simon und Malcolm[3]) und von Stark, Retschinsky und Schaposchnikoff[4]) studiert wurde, war geschichtet. Die Schichtung fing bei einem Druck von 50 mm abwärts sich zu bilden an, anfänglich in vielen ganz dünnen, unscharfen Schichten, die mit abnehmendem Druck an Zahl ab, an Schichtabstand zunahmen und mit ausgezeichneter Schärfe oft mehrere Sekunden andauerten, so daß es mir möglich war, auch einige elektrische Daten festzuhalten. Die Schichten zeigten die Farbe des negativen Glimmlichtes. Das Zustandekommen der Schichten ist jedenfalls der Anwesenheit des Wasserstoffs und der organischen Verbindungen des Leuchtgases zuzuschreiben. Das Wachsen des Schichtabstandes mit abnehmendem Druck

1) A. Hoerburger, Diss. Greifswald 1905.
2) J. Pollack, Ann. d. Phys. **19.** p. 217. 1906.
3) H. Th. Simon u. H.W. Malcolm, Phys. Zeitschr. **8.** p. 471. 1907.
4) J. Stark, T. Retschinsky u. A. Schaposchnikoff, Ann. d. Phys. **18.** p. 213. 1905.

findet seine Erklärung in der Zunahme der freien Weglänge der Gasmolekel.

Diese interessante Entladungsform berechtigt zu der Frage, ob wir darin Glimmlicht oder Bogen vor uns haben. Antwort hierauf erteilen die elektrischen Daten, die ich aufnehmen konnte. Obschon die Stromstärke von 2,1 Amp. für eine Glimmentladung etwas hoch erscheint, wäre immerhin ein solch starker Glimmstrom denkbar. Gegen einen solchen spricht allerdings die relativ geringe Spannung von 210 Volt zwischen den Elektroden. Bekanntlich liegt doch der Kathodenfall für das Glimmlicht über 300 Volt, so daß wir diese Entladung als geschichteten Bogen betrachten müssen.

Den Anlaß, photographische Aufnahmen des Bogens herzustellen, gab der Umstand, daß der Bogen, wie schon oben erwähnt, viele Ansätze zu bilden schien, die auf der Elektrode herumtanzten (Hagenbach und Veillon[1]). Ich überlegte folgendermaßen: Wird der Bogen mit einem schnell arbeitenden Verschluß aufgenommen (ich benutzte einen Schlitzverschluß mit einer Minimalexpositionszeit von 1 : 1000 Sek.), so ist es möglich, einen solch kleinen Zeitabschnitt herauszugreifen, daß während desselben der Bogen keine Gelegenheit hat, „große Sprünge" zu machen, und so, wenigstens annähernd, die momentane Bogenform auf die Platte kommt.

Außerdem sollen diese photographischen Aufnahmen dazu dienen, eine kleine Vorstellung davon zu geben, wie die einzelnen Bogenformen rein äußerlich voneinander verschieden sind. Die Aufnahmen gewinnen an Wert, wenn sie an Hand obiger Beschreibungen studiert werden, wobei zu beachten ist, daß bei allen Aufnahmen die Anode unten ist. Ich hatte den Bogen auch mit Autochromplatten der Firma Lumière aufgenommen; jedoch ist das Resultat wegen der immer noch geringen Allgemeinempfindlichkeit zu unvollkommen, um an dieser Stelle veröffentlicht zu werden. Zur Aufnahme gelangten das Glimmlicht, die Formen 1, 2, 3 und der geschichtete Bogen an rußbedeckten Elektroden. Den Aufnahmen sind zur Orientierung beigefügt: die Bogenform, die Bogenlänge l, die Stromstärke i, die Spannung e zwischen den Elektroden, Gasfüllung und Druck, die relative Öffnung des Objektivs, die Expositionszeit und die Plattensorte.

1) A. Hagenbach u. H. Veillon, l. c.

Bei Form 1 (Fig. 1 der Tafel) beobachtet man auf der Anode deutlich die vielen Punkte größerer Stromdichte, die allerdings in diesem Fall unregelmäßig zerstreut liegen, da schon eine starke Oxydhaut die Elektrodenoberfläche bedeckte. An der Kathode ist der breite Bogenansatz unverkennbar. Form 2 habe ich absichtlich in zwei Aufnahmen wiedergegeben, um einmal zu zeigen, daß neben dem eigentlichen Bogenansatz noch viele kleine Punkte der Anodenoberfläche mitleuchten, offenbar also an der Stromleitung beteiligt sein müssen. Andererseits ergibt ein Vergleich der beiden Aufnahmen, daß der Anodenansatz verschieden ist, und zwar bei der einen gewissermaßen als Kugel auf der Elektrode sitzend, bei der anderen im Gegenteil sich nach unten verbreiternd. Das Bild der Form 3 läßt deutlich den spitzen Anodenansatz erkennen, während der Kathodenansatz eine größere Fläche bedeckt. Diese letztere Erscheinung des breiten Kathodenansatzes haben übrigens alle Formen gemeinsam.

3. Apparate und Methode.

Da meine Arbeit, wie ich schon in der Einleitung erwähnte, im großen und ganzen eine Fortsetzung der Dissertation von Banderet[1]) bedeutet, so habe ich auch in der Hauptsache dessen Apparate und Methode übernommen. Wie dort, brannte auch hier der Bogen in einem gußeisernen Kreuzrohr, durch dessen Arme die Elektroden und die Sonde eingeführt wurden. Eine der Elektroden, und zwar die obere, konnte mittels einer Stopfbüchse luftdicht auf und ab bewegt werden, um die Bogenlänge in einem Bereich von ca. 5 cm zu variieren. Die Natur meiner Messungen hat hingegen folgende Änderungen notwendig gemacht. Bekanntlich ist die Bogenspannung von der Elektrodentemperatur wesentlich abhängig. Nach Simon[2]) gilt die Gleichung:

$$TF = \frac{ei}{W},$$

wo T die Temperatur des Bogenansatzes, F die Kraterfläche und W die durch die Einheit von TF pro Zeiteinheit weggeleitete Wärme bedeuten. Um den Faktor T möglichst konstant zu erhalten, wurde eine der Elektroden, und zwar die

1) E. Banderet, l. c.
2) H. Th. Simon, Physik. Zeitschr. **6.** p. 297. 1905.

untere, stets von innen durch fließendes Wasser gekühlt. Zu diesem Zweck habe ich die untere Verschlußplatte des Kessels zu einem gußeisernen Schemel ausgebildet, der durch eine vertikale, zentrale Bohrung die gekühlte, durch Leder gegen außen abgedichtete Elektrode festgeschraubt enthielt. Die Öffnungen Gasleitungen und Hähne zur Evakuation und Gasfüllung des Kessels waren ähnlich angeordnet.

Um öftere Brüche zu vermeiden, ersetzte ich die gläserne Sondeneinführung durch einen geschliffenen Konus aus Bessemerstahl, der sich sehr gut bewährte. Die Elektroden bestanden aus käuflichem Stangennickel. Die Kathode hatte für meine definitiven Messungen die in Fig. 1b angegebene Form. Sie wurde nämlich in der angedeuteten Weise abgedreht und mit einem Vitreosilrohr der Ton- und Steinzeugwerke Charlottenburg überstülpt, um das lästige Klettern des Bogens wie es auch von vielen anderen Forschern beobachtet wurde zu vermeiden.

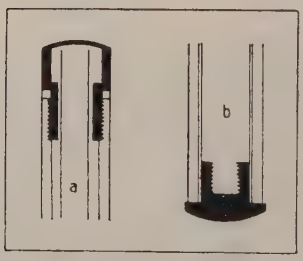

Fig. 1.

Ursprünglich bestand die Stange, an der die eigentliche Nickelelektrode angeschraubt war aus Messing. Aus folgenden Gründen ersetzte ich dieselbe aber durch eine solche aus Eisen. Trotz aller Bemühungen war es mir nicht möglich, die Form 1 bei gekühlter Anode dauernd zu erhalten. An der durch Wasser gekühlten Anode schied der Bogen Kohle aus, wahrscheinlich aus den im Kessel vorhandenen Fettdämpfen. Dadurch wurde der positive Bogenansatz sehr unruhig und undefinierbar indem sozusagen alle drei Formen 1, 2 und 3 nebeneinander brannten und somit eine Messung ausschlossen. Ich versuchte es daher mit der umgekehrten Anordnung, daß also die Kathode gekühlt und die Anode obere Elektrode wurde. Der Erfolg blieb auch nicht aus; denn auf diese Weise erhielt ich Form 1 in wunderbarer Konstanz, so daß Messungen relativ leicht durchgeführt werden konnten; ich sage „relativ“ aus folgendem Grunde.

Es spielt eben hier, wie bei allen meinen Messungen die Temperatur eine das Potential beeinflussende Rolle. Da ja bei der Form 1 der Anodenfall wesentlich höher ist als der

Kathodenfall und somit der größte Teil der im Bogen verbrauchten Energie an der Anode in Wärme umgewandelt wird, erhöht sich die Temperatur der letzteren so rasch, daß besonders bei hoher Stromstärke (7 Amp.), aber auch schon bei mittlerer (5 Amp.), die Nickelelektrode in lebhafte Gelbglut gerät und die Messung unterbrochen werden muß, da der Messingstab zu schmelzen anfängt. Der Ersatz des Messingstabes durch einen solchen aus Eisen mag vielleicht unvorsichtig erscheinen wegen der Beeinflussung der Messungsresultate infolge der verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten von Eisen und Messing. Dieser Einwand fällt jedoch dahin, wenn man bedenkt, daß durch diese Neuanordnung die Form 1 untersucht werden konnte, während sie sich mit dem Messingstab und der gekühlten Anode der Messung entzogen hätte. Der untere Durchmesser der ungekühlten Elektrode betrug 16—20 mm. Die Anode, die, mit wenigen Ausnahmen für die Form 1, gekühlt war, bestand aus einem Eisenrohr, das an seinem oberen Ende einen hohlgedrehten Nickelklotz festgeschraubt enthielt (Fig. 1a). Beide Elektroden wurden sehr oft blank gedreht und auf der Maschine hochpoliert.

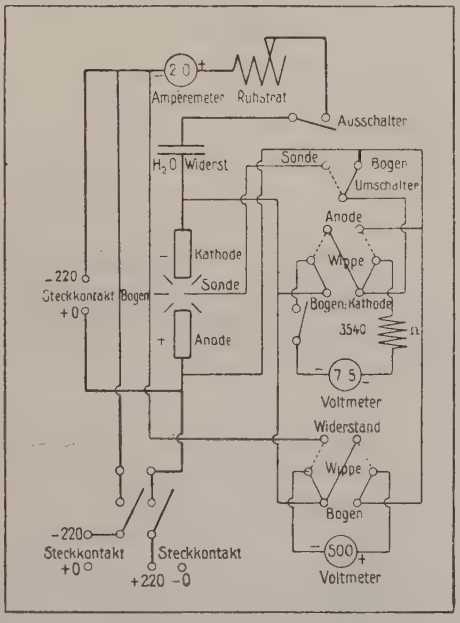

Fig. 2.

Der Meßbereich, 75 Volt, des von mir benutzten Voltmeters der Land- und Seekabelwerke (Widerstand 3540 Ohm) war für viele meiner Messungen, z. B. bei großen Bogenlängen, zu eng und wurde deshalb in solchen Fällen durch einen passend gewählten Vorschaltwiderstand auf das Doppelte erhöht. Die Schaltung geht aus Fig. 2 hervor. Bekanntlich

werden die Spannungsverhältnisse im Bogen durch Einschaltung eines Nebenschlusses, bestehend aus Sonde und Voltmeter, gestört, und zwar um so mehr, je geringer der Widerstand dieses Nebenschlusses ist. Will man daher mit dieser Methode Resultate erzielen, die den absoluten Werten, gemessen mit einem Elektrometer, nahe kommen, so muß man ein Voltmeter von sehr hohem Ohmschen Widerstand verwenden, damit der störende Nebenstrom durch die Sonde verschwindend klein wird. Wie groß dieser störende Einfluß sein kann, zeigte sich am deutlichsten, als Hr. Prof. Hagenbach und ich gemeinsam versuchten, die beiden Gefälle an den Elektroden mit einem selbstregistrierenden Instrument zu messen, und infolge des geringen Widerstandes von nur 1028 Ohm überhaupt keinen Ausschlag des Instrumentes erhielten.

Zur Messung der Stromstärke diente ein Instrument der Firma Hartmann & Braun A.-G., Frankfurt, das den Vorteil großer Aperiodizität besaß und direkte Ablesung von 0,2 Amp. gestattete, so daß es sogar für meine wenigen Glimmstrommessungen genügte. Für die Vorversuche legte ich den Bogen an das Gleichstromnetz von 220 Volt, während für die definitiven Messungen eine Spannung von 440 Volt derselben Stromquelle benutzt wurde.

Beinahe alle meine Messungen beziehen sich auf den Bogen in einer Stickstoffatmosphäre von 15—760 mm Druck. Der Stickstoff entstammte einer Stahlflasche der Firma Sauerstoff- und Wasserstoffwerke Luzern. Um ihn von den letzten Resten Sauerstoff möglichst zu befreien, wurde er vor Einleitung in den Kessel in einem Verbrennungsofen über Kupferspiralen geleitet und gelangte erst nach Passieren einer Chlorcalciumröhre in den Kessel.

Oft kam es vor, daß der Bogen, statt zwischen den beiden Elektroden zu brennen, von der Kathode an die Kesselwand übersprang und so die Messung verunmöglichte. Diesem Übelstand begegnete ich dadurch, daß ich die Kathode mit der beschriebenen Quarzröhre überstülpte, das Innere des Kessels mit einem Zylinder aus Asbestpappe ausfütterte und in diesen die Öffnungen für die Projektion des Bogens und die Sondeneinführung einschnitt.

Die Versuchsbedingungen so zu regulieren, daß alle drei Formen abwechselnd nebeneinander auftraten, gelang mir nie;

immer herrschte eine Form vor, so daß diese für sich allein gemessen werden konnte. Lange Zeit hatte ich einen Bogen, in dem drei Formen nebeneinander zu existieren schienen. Tatsächlich war es nur ein sehr rascher Wechsel zwischen denselben, was man an der Unruhe des Voltmeters erkennen konnte, das sich überhaupt nie einstellte. Auch ein Telephon, in Serie mit einer Kapazität an den Bogen gelegt, gab durch ein lebhaftes Knistern diesen raschen Formenwechsel zu erkennen.

Für die Aufnahme von Charakteristiken wurde zunächst der Gasdruck so reguliert, daß eine gewünschte Bogenform sich gut ausbildete und Gewähr für eine längere Brenndauer bot. Während der darauffolgenden Messung blieb der Gasdruck konstant. Nun wurde für eine beliebige Bogenlänge, z. B. 2,0 cm, die Stromstärke durch einen Vorschaltwiderstand in Intervallen von 0,25—1,0 Amp. variiert und für alle i das zugehörige e abgelesen. Dieses Meßverfahren führte ich für alle diejenigen Bogenlängen durch, bei denen die betreffende Bogenform noch gut brannte. Es stellte sich nämlich heraus, daß Verkleinerung der Bogenlänge das Überschlagen einer Form in die nächst höher bezifferte begünstigt, also z. B. von 2 in 3.

Tabelle 1.

Die Bogenspannung beträgt in Volt für die

Stromstärke in Ampères	Bogenlänge in Zentimetern: 2,2	1,8	1,4	1,0	0,6	
2,0	132	117	104	87	66	
2,5	117	107	93	80	60	
3,0	107	99	88	74	56	
3,5	101	93	83	70	54	
4,0	96	88	79	67	53	$p = 250$ mm N_2
4,5	92	84	76	65	52	
5,0	88	81	74	64	51	
5,5	85	79	71	63	49	

Dieses Überschlagen schreibe ich dem gegenseitigen Einfluß der Elektroden zu, der sich in einer Temperaturerhöhung äußert. Je näher sich die Elektroden gegenüberstehen, um so größer ist auch der Einfluß, den sie in Form von Wärmestrahlung aufeinander ausüben. So ist es leicht denkbar, daß die

Anodentemperatur bei Form 2 z. B. durch Annäherung der Kathode auf den Siedepunkt gebracht wird und so die Existenzbedingungen für die Form 3 eingeleitet werden.

In Tabelle 1 sind die Resultate einer solchen Messungsreihe für die Form 2 bei 250 mm Stickstoff enthalten. In der ersten Kolonne steht die Stromstärke in Ampères, in den folgenden fünf Kolonnen die zugehörige Bogenspannung für die am Kopf jeder dieser Kolonne angegebenen Bogenlänge in Zentimetern. Die maximale Stromstärke war 7 Amp.; steigerte ich dieselbe noch mehr, so schmolz die Kathode, und das Kühlwasser der Anode fing an zu sieden. Nach unten war die Stromstärke durch die angelegte Spannung ebenfalls begrenzt (Kaufmann[1]], Simon[2]]). Bekanntlich hängt die minimale Stromstärke, bei der ein Bogen noch bestehen kann, von Simon[2]) als kritische Stromstärke bezeichnet, von der verfügbaren Spannung und dem vorgeschalteten Widerstand ab, und zwar ist für eine gegebene Spannung die Stromstärke ein Minimum, wenn die Widerstandslinie die Charakteristik tangiert. Man hat es also in der Hand, durch Erhöhung der angelegten Spannung die kritische Stromstärke herunterzusetzen. Ich hatte mir anfänglich vorgenommen, meine Messungen auch in dieser Richtung auszudehnen. Leider war aber meine Apparatur für diesen Zweck zu unvollkommen, so daß ich von meinem Vorhaben absehen mußte.

Ganz ähnlich, wie oben beschrieben, verfuhr ich, um auch den Einfluß des Gasdruckes auf das Bogenpotential zu studieren. Durch Probieren ermittelte ich für die gewünschte Bogenform die günstigste Bogenlänge und variierte nun unter Konstanthalten derselben den Gasdruck im Existenzbereich der betreffenden Bogenform, der unter Umständen wie bei Form 1 sehr eng sein kann und eine Messung nach dieser Seite ausschließt.

Dieses Meßverfahren, für alle möglichen Stromstärken wiederholt, lieferte Reihen von Ablesungen, von denen Tab. 2 ein Beispiel gibt. Für das Studium der Resultate empfiehlt es sich, die Ablesung in Form von Kurven wiederzugeben, wie es in den einzelnen Kapiteln geschehen ist.

---

1) W. Kaufmann, l. c.
2) H. Th. Simon, l. c.

Tabelle 2.

Die Bogenspannung beträgt in Volt für

Stromstärke in Amp.	Gasdruck in Millimeter Hg: 80	100	120	140	160	180	200	220	240
2,0	68	69	70	70	71	70	71	70	70
2,5	64	65	65	64	65	66	65	66	66
3,0	60,5	61	61	60,5	61	62	62	61	61
3,5	57	58	58,5	58	59	59	59	59	58
4,0	54,5	56	55,5	55,5	56	56,5	56	56,5	56
4,5	53	53	53,5	53	54	54	54	54,5	54
5,0	52	52	52	52	52	52	52,5	52,5	52,5
5,5	51	50,5	51	50	51	51	—	51	51

Von großem Interesse wäre es natürlich gewesen, diese verschiedenen Messungen für alle Bogenformen durchzuführen, wie ich es mir in meinem Programm vorgenommen hatte. Diese angestrebte Vollständigkeit nach jeder Seite konnte aus verschiedenen Gründen nicht erreicht werden. Entweder war die Bogenform nur für einen ganz engen Bereich des Gasdruckes existenzfähig (Form 1), oder sie ließ keine großen Veränderungen der Stromstärke und der Bogenlänge zu, so daß ich mich oft mit der Messung einer einzigen Form begnügen mußte. Am günstigsten erwies sich fast durchweg die Form 2, weshalb sie auch in dieser Arbeit vorherrscht. Da es sich hier mehr um den Einfluß verschiedener Versuchsbedingungen auf die allgemeinen Eigenschaften aller Formen als um den Unterschied der Formen unter sich handelt (Banderet[1]), so ist diese teilweise Unvollständigkeit zu verschmerzen.

Über die Sondenmessungen ist folgendes zu sagen: Ich stellte zunächst ohne Sonde den Einfluß der verschiedenen Versuchsbedingungen auf die ganze Bogenspannung fest und zog aus den erhaltenen Resultaten an Hand der Kurven vorhersagende Schlüsse auf die Potentialgefälle an den Elektroden. Um diese Vorhersage experimentell zu prüfen, führte ich unter denselben Bedingungen auch die Sondenmessungen durch, deren Durchführung kurz geschildert werden möge. Wie aus der schematischen Schaltungsskizze der Fig. 2 hervorgeht, konnte die Sonde über ein Voltmeter mittels einer Wippe entweder mit der Anode oder mit der Kathode verbunden

1) E. Banderet, l. c.

werden. Das Voltmeter mit hohem Ohmschen Widerstand zeigte dann direkt die Potentialdifferenz zwischen irgendeinem Punkt des Bogens und derjenigen Elektrode an, die gerade mit der Sonde in leitender Verbindung stand. Die Messung dieser Potentialdifferenz, für möglichst viele Punkte des Bogens durchgeführt, ergab Kurven, wie sie in den Figg. 8 und 9 enthalten sind. Dabei denke man sich im Nullpunkt des Koordinatensystems jeweils die entsprechende Elektrode. Auf der Abszissenachse sind die Abstände der Sonde von den Elektroden in Millimetern angegeben und die zugehörigen Potentialdifferenzen als Ordinaten eingezeichnet. Durch Verbindung der so erhaltenen Punkte entstehen dann Kurven, die den Potentialverlauf im Bogen darstellen.

4. Untersuchungen über die ganze Bogenspannung.

A. Einfluß der Stromstärke und der Bogenlänge.

Wie ich schon am Schluß des vorigen Kapitels mitteilte, handelt es sich darum, zuerst den Einfluß der verschiedenen Versuchsbedingungen auf die ganze Bogenspannung festzustellen, um aus dem Verlauf der Kurven Schlüsse auf die Beeinflussung der Gefälle an den Elektroden ziehen zu können. Oben wurde bereits die Methode der experimentellen Untersuchung erwähnt, und wir wollen nun an Hand der Kurven die Resultate diskutieren.

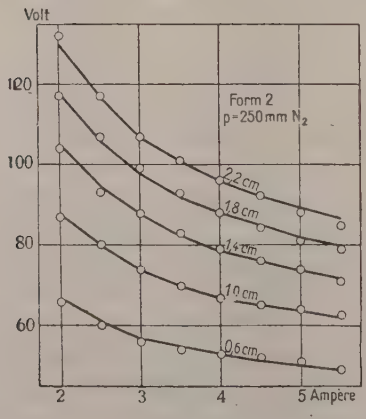

Fig. 3.

Tragen wir die Zahlenwerte der Tab. 1 in ein Koordinatensystem ein, und zwar die ganze Bogenspannung als Funktion der Stromstärke, so erhalten wir für jede Bogenlänge eine Kurve, die sogenannte Charakteristik. In Fig. 3 sind Charakteristiken der Form 2 für die Bogenlängen 0,6, 1,0, 1,4, 1,8 und 2,2 cm wiedergegeben; übereinstimmend mit anderen, früheren Messungen von Arons[1]), Guye und Zebrikoff[2]),

1) L. Arons, l. c.

2) G. E. Guye u. L. Zebrikoff, Physik. Zeitschr. 8. p. 703. 1907.

Hagenbach und Veillon[1]), Stark und Cassuto[2]) und Ayrton[3]) sind diese Kurven konvex gegen beide Achsen. Mit wachsender Bogenlänge rücken sie näher zusammen. Diese Tatsache sagt aus, daß die größte Änderung des Potentials im Bogen selbst und nicht an den Elektroden liegt. Wenn diese Theorie richtig ist, so muß der Abstand zweier Kurven bei gleichbleibender Bogenlänge schließlich konstant werden, was ich allerdings experimentell nicht feststellen konnte, da mir die dazu notwendige hohe Spannung nicht zur Verfügung stand und außerdem der Bogenlänge durch die Apparatur selbst eine Grenze gesetzt war.

Wie schon Hagenbach und Veillon festgestellt haben, zeigen alle Bogenformen denselben Verlauf ihrer Charakteristiken, und zwar hat im allgemeinen für eine bestimmte Bogenlänge Form 1 die höchsten, Form 3 die tiefsten Werte der Spannung, vorausgesetzt, daß auch Form 1 mit gekühlter Anode brannte. Kühlte ich dagegen, um Form 1 gut zu erhalten, die Kathode, so sanken die Spannungswerte der Form 1 selbst unter diejenigen der Form 2. Die beiden obigen Forscher weisen schon darauf hin, daß die Charakteristiken zweier Bogenformen einander schneiden können.

Entgegen den Angaben von Grau und Russ[4]) stellte ich fest, daß der Nickelbogen der Gleichung von Ayrton[5])

$$e = a + bl + \frac{c + dl}{i}$$

nicht genügt. Damit diese erfüllt ist, müssen sowohl die Leistungs-Stromstärkekurven als auch die Leistungs- Bogenlängekurven Geraden sein, die sich in einem Punkt schneiden. Wie aus Fig. 4 hervorgeht, wird der ersten Bedingung Genüge geleistet; daß die zweite nicht erfüllt wird, zeigt Fig. 6.

Aus Fig. 4 lassen sich nun wichtige Schlüsse ziehen auf die Potentialverteilung im Bogen bei Variation der Bogenlänge. Jede Gerade schneidet die Wattaxe in einem anderen

---

1) A. Hagenbach u. H. Veillon, l. c.
2) J. Stark u. L. Cassuto, Physik. Zeitschr. **5.** p. 264. 1904.
3) Hertha Ayrton, l. c.
4) A. Grau u. F. Russ, Physik. Zeitschr. **9.** p. 107. 1908.
5) Hertha Ayrton, l. c.

Punkt, da der Konvergenzpunkt aller Geraden links der Watttaxe liegt. Wir können diese Schnittpunkte als die Energien eines Bogens mit der Stromstärke Null auffassen, bei dem also durch Variation der Bogenlänge nur diese potentialbeeinflussend wirken kann. Demnach braucht dieser Bogen mit der Stromstärke Null für jede Bogenlänge eine besondere Energie und besitzt somit für jede Bogenlänge eine andere Bogenspannung. Diese Überlegung gibt uns aber keinen Auf-

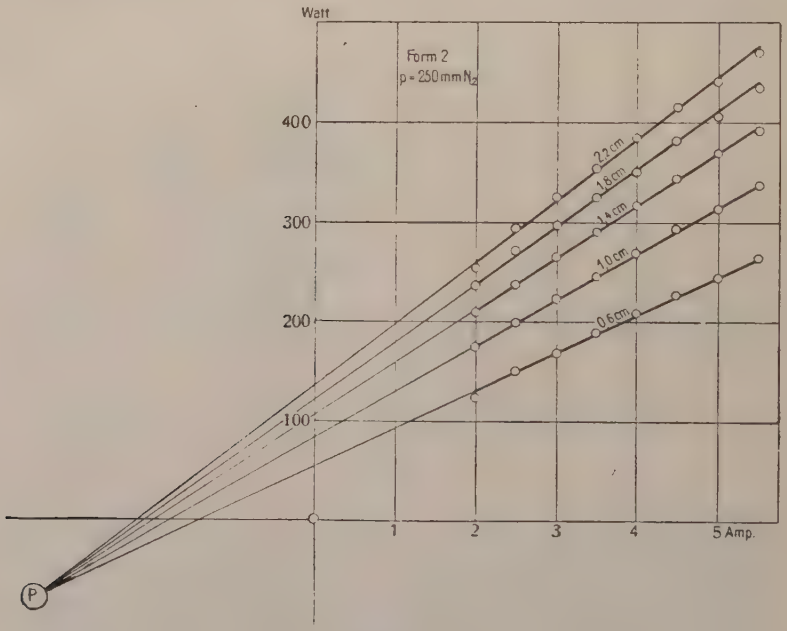

Fig. 4.

schluß darüber, wo diese Änderung der Bogenspannung ihren Sitz hat, ob im Bogen selbst durch Änderung des Gradienten oder in den Gefällen an beiden Elektroden. Eindeutigen Aufschluß über diese Frage liefern die von mir durchgeführten Sondenmessungen.

Ganz analoge Schlüsse lassen sich aus den Kurven ziehen, die man erhält, wenn man die Bogenspannung oder die Leistung als Funktion der Bogenlänge in ein Koordinatensystem zeichnet. Die Figg. 5 und 6 geben die Resultate der Tab. 1 in der

eben beschriebenen Weise wieder. Sie zeigen summarisch den Einfluß der Bogenlänge auf die ganze Bogenspannung. Wie schon oben betont, sind die Kurven nicht gerade, sondern deutlich gekrümmt, und zwar konvex gegen die Volt- bzw. Wattachse, wie schon Stark, Retschinsky u. Schaposchnikoff[1]) und verschiedene andere für den Kupferbogen gefunden haben, während Ayrton[2]) für den Kohlebogen und Guye und Zebrikoff[3]) für verschiedene Metallbogen Gerade fanden. Aus Fig. 4 folgt, daß die Bogenlänge-Leistungskurven äquidistant sind, während die Volt-Bogenlängekurven nach niederen Stromstärken auseinanderrücken; d. h. die Zunahme der im Bogen verbrauchten Energie ist für eine gegebene Bogenlänge eine lineare Funktion der Stromstärke. Dieses Ergebnis steht allerdings im Widerspruch zu den Untersuchungsresultaten von Grotrian[4]) der für den Eisenbogen Kurven findet von der Form in Fig. 5, also konvex gegen die Wattaxe.

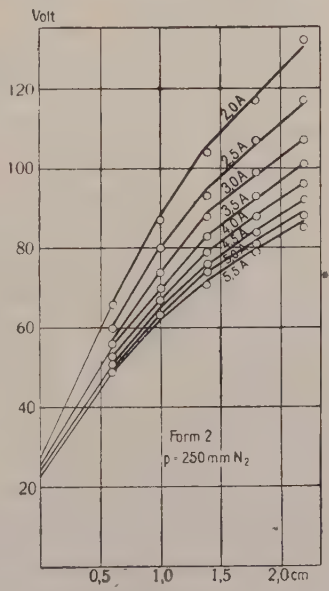

Fig. 5.

Die Extrapolation nach kleinen Werten der Bogenlänge stößt hier insofern auf Schwierigkeiten, als die Funktionalbeziehung zwischen Bogenlänge einerseits, Bogenspannung bzw. Leistung andererseits, keine lineare ist, und somit der Verlauf der Kurven nach kleineren Bogenlängen nicht mit derselben Sicherheit und Genauigkeit gezeichnet werden kann, wie es bei Fig. 4 der Fall ist. Immerhin läßt sich bei Annahme der unzweifelhaften Richtigkeit von Fig. 4 durch Umrechnung aus dieser eine approximative Extrapolation dennoch durchführen, wie sie in den Figg. 5 und 6 angedeutet wurde.

---

1) J. Stark, T. Retschinsky u. A. Schaposchnikoff, l. c.
2) Hertha Ayrton, l. c.
3) G. E. Guye u. L. Zebrikoff, l. c.
4) Walter Grotrian, l. c.

Wenn die Extrapolation auch gewagt erscheint, glaube ich dennoch, wenigstens qualitative Schlüsse daraus ziehen zu dürfen. Die Konvergenz der Kurven der Bogenspannung gegen die Voltachse sagt aus, daß die Änderung der Spannung mit der Stromstärke viel langsamer ist für kleine Bogenlängen als für große, d. h. sie ist hauptsächlich in der Gassäule des Bogens selbst zu suchen. Jede Kurve der Figg. 5 und 6 schneidet die Volt- bzw. Wattachse in einem anderen Punkt. Dieser repräsentiert aber nichts anderes als die Bogenspannung bzw. die im Bogen verbrauchte Energie für die Bogenlänge Null. In einem solchen Grenzbogen fällt aber die Gassäule weg, und es bleibt somit nur die Summe $e = a + k$ der beiden Spannungsgefälle an den Elektroden. Folglich muß die Summe $e = a + k$ aus Anoden- und Kathodenfall eine Funktion der Stromstärke sein. Durch diese Überlegung ist allerdings noch nicht dargetan, ob beide Gefälle sich funktionell mit der Stromstärke ändern, oder ob es nur das eine tut, und welches.

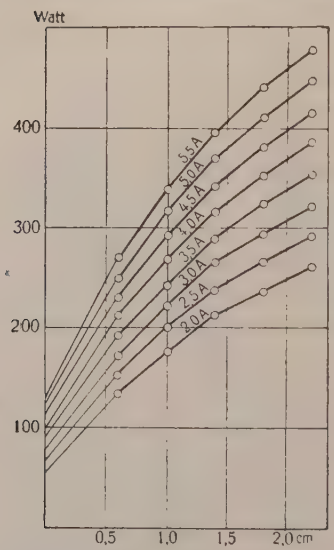

Fig. 6.

Wenn wir mit der Theorie von Stark einig gehen, so kann es sich hier nur um eine Änderung des Anodenfalles handeln. Nach dieser Theorie stellt doch der Kathodenfall des Lichtbogens die Energie dar, welche im Minimum von einem Elektronion als Arbeit zur Ionisierung eines neutralen Atoms des Kathodenmetalles aufgewendet werden muß. Er gewinnt demnach die Bedeutung einer physikalisch-chemischen Konstanten des einzelnen chemischen Atoms. Als Ionisierungsspannung muß er in weiten Grenzen unabhängig sein von der mittleren Temperatur, dem Dampfdruck und der Stromstärke. Inwieweit diese Forderung erfüllt wird, zeigen die entsprechenden Sondenmessungen.

B. Die Bogenspannung als Funktion des Gasdruckes.

Hagenbach und Veillon[1]) haben von fast allen Bogenformen Volt-Druckkurven aufgenommen und fanden, daß dieselben bei den Formen 2, 3, 3a ein Minimum bei relativ niederem Druck aufweisen; Form 1 und 1a dagegen zeigen ein Maximum. Arons[2]) gibt an, daß die Spannung mit dem Gasdruck wächst. Dieselbe Funktionalbeziehung finden Hoerburger[3]) beim Kohlebogen und schließlich auch Monasch[4]) für den Wechselstrombogen.

Ich konnte nur die Formen 2 und 3 untersuchen, da Form 1 nur in einem ganz engen Bereich des Druckes existenzfähig war und sich ohnehin schon beinahe allen Messungen entzog, wie ich oben schon andeutete. Im Vergleich zu den Resultaten von Hagenbach und Veillon[1]) ist der Einfluß des Gasdruckes auf die Spannung des Nickelbogens bedeutend kleiner als beim Kupferbogen. Die Fig. 7 gibt eine Messungsreihe für die Form 2 wieder. Die Kurven sind gebildet aus den Zahlenwerten der Tab. 2 auf p. 19. Von einem ausgesprochenen Minimum der Kurven ist nichts zu entdecken; hingegen haben beide Formen gemeinsam, daß mit wachsendem Druck auch die Bogenspannung zunimmt. Immerhin beträgt diese Zunahme für die Form 3 im günstigsten Fall nur 2 Volt auf eine Druckerhöhung von 500 mm Hg, eine Größenordnung, die auch von Child[5]) angegeben wird. Bei der Form 2 tritt dieselbe Spannungserhöhung schon für eine Erhöhung des Druckes um 160 mm ein. Der Spannungsgradient für eine Druckvariation wäre demnach für Form 2 dreimal so groß wie bei Form 3. Um über einen eventuellen Einfluß des Gasdruckes auf die Gefälle an den beiden Elektroden Aufschluß zu erhalten, untersuchte ich den Bogen auch

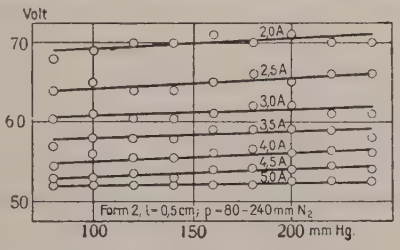

Fig. 7.

1) A. Hagenbach u. H. Veillon, l. c.
2) L. Arons, l. c.
3) A. Hoerburger, l. c.
4) B. Monasch, Elektrotechn. Zeitschr. **23.** p. 957. 1902.
5) C. D. Child, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektr. **3.** p. 189. 1906.

nach dieser Seite hin mit der Sonde. Dabei stellte sich jedoch heraus, daß eine meßbare Änderung nicht vorhanden war, und somit die wenigen Volt Änderung dem Potentialgradienten der Gassäule zugeschrieben werden müssen.

5. Sondenmessungen.

Anoden- und Kathodenfall als Funktion der Bogenlänge und der Stromstärke.

Die obigen Kapitel haben uns den Einfluß von Stromstärke, Bogenlänge und Gasdruck auf die ganze Bogenspannung gezeigt. Wir haben dort festgestellt, daß eine Änderung, bewirkt durch Bogenlänge und Stromstärke, sowohl in der Gassäule des Bogens als auch an den Elektroden vorhanden ist. Jene Überlegungen gaben uns aber nur Aufschluß über die Änderung der Summe $e = a + k$ von Anoden- und Kathodenfall, nicht aber über die Änderung jeder einzelnen dieser beiden Größen. Um diesen Einfluß der Stromstärke und Bogenlänge auf Anoden- und Kathodenfall eindeutig festzustellen, untersuchte ich den Bogen mit der Sonde. Obschon die Messungen schwierig auszuführen waren und auf absolute Werte keinen Anspruch erheben dürfen, glaubte ich dennoch in den Figg. 8 und 9 wenigstens den Sinn der Beeinflussung wiedergeben zu können.

Wie ich schon oben auseinandersetzte, stellen die Kurven der Figg. 8 und 9 den Potentialverlauf im Bogen dar. Die Ordinate eines beliebigen Punktes der Abszissenachse (Bogenpunktes) ist die Potentialdifferenz, gemessen in Volt, zwischen diesem Bogenpunkt und der entsprechenden Elektrode, mit welcher der Punkt durch die Sonde über ein Voltmeter verbunden ist (vgl. Fig. 2). Extrapolieren wir die Potentialkurven bis zum Schnitt mit der Ordinatenachse, so gibt uns der Abschnitt auf der Ordinatenachse das Potential eines unendlich nahe an der betreffenden Elektrode gelegenen Punktes an, das wir als Anoden- und Kathodenfall definieren wollen. Die andere Methode zur Bestimmung von Anoden- und Kathodenfall, bei der man diese Potentialdifferenzen durch möglichste Annäherung der Sonde an die Elektroden mißt, gelang mir nicht; denn die Störungen der Sonde im Bogenansatz waren so groß, daß die Messung erfolglos blieb und ich somit die erstbeschriebene Methode wählte. Leider mußte ich mich auch hier, wie in den meisten Messungen, auf die Form 2 be-

schränken, da sie der Messung am besten zugänglich war und deshalb die beste Gewähr für annehmbare Resultate bot.

Aus Fig. 8 geht deutlich hervor, daß eine Änderung der beiden Gefälle durch die Stromstärke vorhanden ist, und zwar an der Kathode stärker als an der Anode. Die beiden Gefälle sinken mit wachsender Stromstärke, was auch schon Ayrton[1]) für den Kohlebogen fand. Grotrian[2]) gibt an, daß der Anodenfall sowohl für Kohle als auch für Metalle, ähnlich der ganzen Bogenspannung, hyperbelartig mit wachsender Stromstärke abnehme, während er für den Kathodenfall nur eine geringe Abnahme mit wachsender Stromstärke feststellen kann. Stark, Retschinsky und Schaposchnikoff[3]) hingegen fanden, daß der Kathodenfall beim Quecksilberbogen in weiten Grenzen von der Stromstärke unabhängig sei, während der Anodenfall mit der Stromstärke etwas wachse. Skinner[4]) gibt an, daß bei Glimmentladung der Anodenfall von der Stromdichte unabhängig sei.

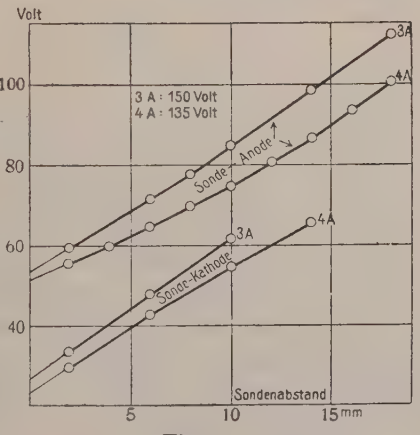

Fig. 8.

Aus beiden Figuren ist unverkennbar ersichtlich, daß der Potentialgradient im Bogen keineswegs konstant ist, nicht bei Variation der Stromstärke im allgemeinen, sondern auch räumlich bei konstanter Stromstärke an verschiedenen Stellen der Gassäule. So beträgt er z. B. in der Nähe der Kathode für 1 mm Bogenlänge 3,5 Volt, während auf die gleiche Strecke in der Nähe der Anode nur 3,0 Volt entfallen. Es scheint dieses Verhalten auf den ersten Blick etwas merkwürdig, da doch anzunehmen wäre, der Metalldampf an der Kathode hätte ein größeres Leitvermögen als die Stickstoff-

1) Hertha Ayrton, l. c.
2) Walter Grotrian, l. c.
3) J. Stark, T. Retschinsky u. A. Schaposchnikoff, l. c.
4) C. A. Skinner, Ann. d. Phys. **68.** p. 752. 1899.

säule des Anodenansatzes. Wie diese Messungen zeigen, scheint also die etwas oberflächliche Auffassung über das Leitvermögen der Gassäule nicht verallgemeinert werden zu können. Jedoch dürfte eine einwandfreie Erklärung des merkwürdigen Verhaltens nicht ohne weiteres auf der Hand liegen.

Wie ich oben an Hand der (l, V)-Kurven und Watt-Bogenlängekurven gezeigt habe, ist die Summe $e = a + k$ aus Anoden- und Kathodenfall eine Funktion der Bogenlänge. In jenen Auseinandersetzungen ist aber nicht fest-

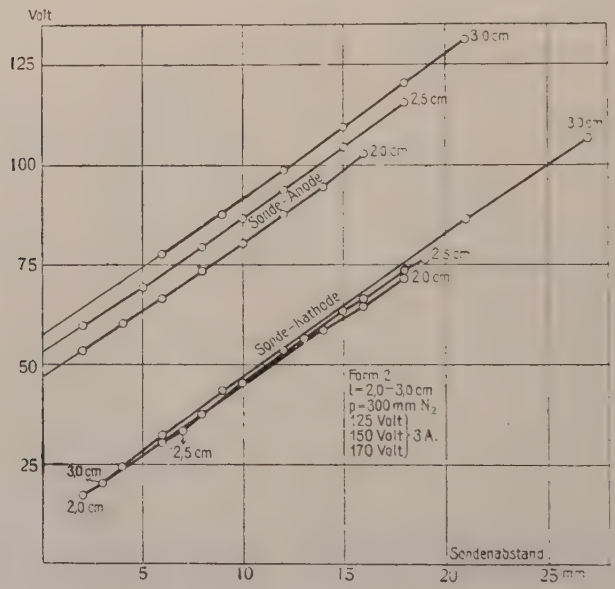

Fig. 9.

gestellt, welcher der beiden Summanden sich ändert und in welcher Weise. Auch hier gibt auf die Frage nach dem Sitz der Potentialveränderung die Sondenmessung unzweideutigen Aufschluß. In Fig. 9 ist eine solche Messung der Form 2 für die Bogenlängen 2,0, 2,5 und 3,0 cm wiedergegeben, und zwar für die konstante Stromstärke 3 Amp. Aus der guten Parallelität der Kurven geht deutlich hervor, daß der Potentialgradient in der Gassäule des Bogens bei Variation der Bogenlänge fast konstant ist, eher für große Bogenlängen etwas

größer. Diese letztere Tatsache wäre vielleicht dadurch zu erklären, daß bei kleinen Bogenlängen der Temperatureinfluß der Elektroden den Gradienten der Gassäule heruntersetzt.

Ganz im Einklang mit den Messungen von Ayrton[1]), Grotrian[2]) und anderen ist die Änderung des Kathodenfalles mit der Bogenlänge, wenn überhaupt vorhanden, sehr gering. Ebenfalls in Übereinstimmung mit Ayrton, aber in absolutem Gegensatz zu Luggin[3]) und Grotrian, fand ich auch am Nickelbogen eine Zunahme des Anodenfalles mit wachsender Bogenlänge.

6. Stabilität des Bogens.

Schon Hagenbach und Veillon[4]) geben an, daß bei günstig gewählten Versuchsbedingungen sämtliche Formen des Kupferbogens abwechselnd nebeneinander erhältlich sind, und daß der Übergang von einer Form in die andere stets sprungweise erfolge. Leider habe ich beim Nickelbogen diese Bedingungen nie finden können; höchstens erreichte ich es, daß ohne wissentliche äußere Beeinflussung zwei Formen miteinander, allerdings sehr rasch, abwechselten. Auch Cady und Arnold[5]) studierten den Übergang von einer Form in die andere und bezeichneten den Übergang als kritischen Punkt. Cady[6]) sucht die für den Übergang notwendigen Bedingungen zu finden, besonders diejenigen für den Übergang von Form 1 in Form 2.

Ich stellte mir die Aufgabe, die elektrischen Daten eines solchen Überganges festzustellen und zu prüfen, ob sich dieselben der zuerst von Kaufmann[7]) eingeführten Stabilitätstheorie unterziehen lassen.

Bekanntlich besitzen alle Entladungsformen für dieselben Versuchsbedingungen verschiedene (V, i)-Kurven (Charakteristiken). Nach Hagenbach und Veillon lagern sich die

1) Hertha Ayrton, l. c.
2) Walter Grotrian, l. c.
3) H. Luggin, Wien. Sitzungsber. 98. IIa. p. 1192. 1889.
4) A. Hagenbach u. H. Veillon, l. c.
5) W. G. Cady u. H. D. Arnold, Physik. Zeitschr. 8. p. 890. 1907.
6) W. G. Cady, l. c.
7) W. Kaufmann, l. c.

Charakteristiken im allgemeinen von unten nach oben in der Reihenfolge der Formen 3a, 3, 2a, 2, 1a, 1 und Glimmlicht übereinander, wie es die Fig. 10 für zwei Bogenformen schematisch veranschaulicht. Fast alle Messungen auf diesem Gebiet stimmen darin überein, daß der Übergang sprungweise erfolgt, und zwar so, daß bei fallenden Charakteristiken mit dem Sinken der Bogenspannung ein Wachsen der Stromstärke verbunden ist, ohne Änderung des äußeren Widerstandes (Stark[1]).

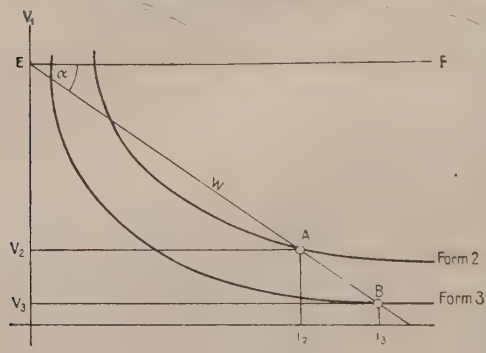

Fig. 10.

Haben wir einen Lichtbogenstromkreis mit der angelegten Spannung E, dem Vorschaltwiderstand W, der Bogenspannung V_2 und der Stromstärke i_2 für den Punkt A der Charakteristik, so gilt:

$$W = \frac{E - V_2}{i_2} = \operatorname{tg} \alpha,$$

wo α den Neigungswinkel der Geraden EA mit der Geraden EF bildet. Dank obiger Beziehung heißt die Gerade EA die Widerstandslinie des Punktes A für die angelegte Spannung E. Wenn nun der Übergang von einer Form in die andere, z. B. von A nach B erfolgt, ohne daß der äußere Widerstand geändert wurde, so muß folgerichtig B auf derselben Widerstandslinie liegen wie A. Für den Punkt B gilt aber die Gleichung:

$$W = \frac{E - V_3}{i_3} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Da die beiden Punkte A und B auf derselben Geraden liegen, so muß die Gleichung bestehen:

$$\frac{E - V_2}{i_2} = \frac{E - V_3}{i_3}.$$

Um zu prüfen, ob die Daten des Überganges von einer

1) J. Stark, l. c.

Form in die andere der obigen Bedingungsgleichung genügen, stehen zwei Wege offen:

1. Man trägt die Daten graphisch in ein Koordinatensystem ein, verbindet die entsprechenden Punkte durch eine Gerade und prüft, ob diese mit den Widerstandslinien der beiden Punkte zusammenfällt bzw. ob sie die Ordinatenachse in der angelegten Spannung schneidet.

2. Man mißt mit Volt- und Ampèremeter die Größen E, V_2, V_3, i_2 und i_3, setzt sie in die Bedingungsgleichung ein und prüft, ob diese erfüllt wird.

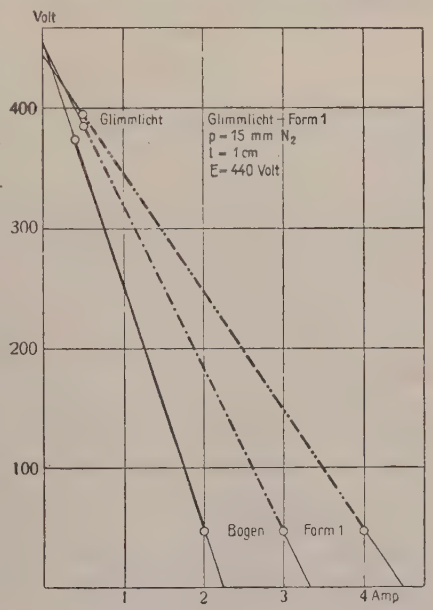

Fig. 11.

Der erste Weg ist für den Übergang von Glimmlicht zu Form 1 in drei Fällen durch Fig. 11 wiedergegeben. Aus dieser geht deutlich hervor, daß der Gleichung so gut wie genügt ist.

Um den Fehler an Hand von Zahlen zu beurteilen, wollen wir zur Kontrolle auch den zweiten Weg einschlagen und erhalten für die drei Messungen folgende Resultate:

$$\text{a)}\quad \frac{440-374}{0{,}4} = \frac{440-47}{2{,}0} \quad \text{oder}: 165 = 196{,}5,$$

$$\text{b)}\quad \frac{440-385}{0{,}5} = \frac{440-47}{3{,}0} \quad \text{oder}: 110 = 131,$$

$$\text{c)}\quad \frac{440-395}{0{,}5} = \frac{440-49}{4{,}0} \quad \text{oder}: 90 = 97{,}7.$$

Auf den ersten Blick wird nun jeder mit Recht die Erfüllung der Bedingungsgleichung anzweifeln. Der Zweifel fällt aber bald dahin, wenn man einmal die Figur näher studiert und weiß, daß die kleine Stromstärke für das Glimmlicht nicht mit einem Präzisionsinstrument für diesen Bereich,

sondern mit einem viel unempfindlicheren Ampèremeter gemessen wurde und somit ein kleiner, hier begangener Fehler bei Einsetzung in die Gleichung sehr ins Gewicht fällt. Leider konnte ich nur den Übergang vom Glimmlicht zur Form 1 und umgekehrt studieren, da die Übergänge zwischen den anderen Formen, wenn überhaupt erhältlich, so schnell hin- und herpendelten, daß eine Messung ausgeschlossen blieb.

Zusammenfassung und Schluß.

Die vorliegende Arbeit enthält, in Kürze zusammengefaßt, folgende Resultate:

1. Es wurden die von Hagenbach und Veillon[1]) beim Kupfer und Eisen gefundenen Bogenformen am Nickelbogen bestätigt und, soweit erhältlich, in Luft und Stickstoff an Hand photographischer Aufnahmen beschrieben. Außer in dem Falle, wo der Bogen in Luft bei Atmosphärendruck brannte und Form 3a erschien, konnten nur die Formen 1, 2, 3 und das reine Glimmlicht erhalten und gemessen werden. Zwischen rußbedeckten Elektroden in Leuchtgas von ca. 20 mm Druck fand ich außerdem einen Bogen mit deutlicher Schichtung.

2. Es wurden die Charakteristiken aller erhältlichen Bogenformen zwischen Nickelelektroden in Stickstoff gemessen und dabei festgestellt, daß dieselben der Ayrtonschen Gleichung nicht genügen. Die Watt-Stromstärkekurven sind allerdings Gerade, die sich in einem Punkt links der Wattachse schneiden; die Watt-Bogenlängenkurven hingegen zeigen eine konvexe Krümmung gegen die Wattachse.

3. Der Einfluß des Gasdruckes auf die ganze Bogenspannung ist sehr gering. Er ist bei Form 2 ungefähr dreimal so groß wie bei Form 3. Einfluß des Gasdruckes auf Anoden- und Kathodenfall durch Sondenmessungen konnte nicht festgestellt werden.

4. Durch Sondenmessungen wurde festgestellt, daß Anoden- und Kathodenfall mit steigender Stromstärke etwas sinken, und zwar der Kathodenfall etwas mehr als der Anodenfall. Der Kathodenfall ist unabhängig von der Bogenlänge; hingegen nimmt der Anodenfall mit der Bogenlänge zu. Der Potentialgradient längs der Gassäule des Bogens ist nicht

1) A. Hagenbach u. H. Veillon, l. c.

konstant, sondern in der Nähe der Kathode etwas größer als in Anodennähe.

5. Der Übergang von einer Form in die andere erfolgt stets sprungweise, und zwar vom Glimmlicht zu Form 1 oder umgekehrt auf der Widerstandslinie. Infolge des sehr raschen Hin- und Herpendelns bei den anderen Formen konnte dort diese Beziehung nicht festgestellt werden.

Die vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Universität Basel ausgeführt. Dem Leiter des Institutes, meinem verehrten Lehrer Hrn. Prof. Dr. August Hagenbach, verdanke ich die Anregung zu dieser Arbeit und bin ihm für das stets fördernde Interesse und die guten Ratschläge zu größtem Dank verpflichtet.

Form 1.

l = 2,0 cm
i = 7,0 Amp.
e = 68 Volt
p = 15 mm N_2
f = 1 : 50
t = ca. 0,03 sec
Hauff
ortho-l.-frei

Fig. 1.

Fig. 2.

Form 2.

l = 3,0 cm
i = 5,0 Amp.
e = 114 Volt
p = 100 mm N_2
f = 1 : 50
t = ca. 0,03 sec
Hauff
ortho-l.-frei

Form 2.

l = 2,0 cm
i = 5,0 Amp.
e = 75 Volt
p = 45 mm N_2
f = 1 : 50
t = ca. 0,03 sec
Hauff
ortho-l.-frei

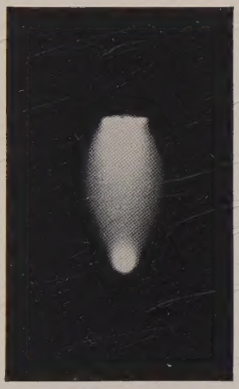

Fig. 3.

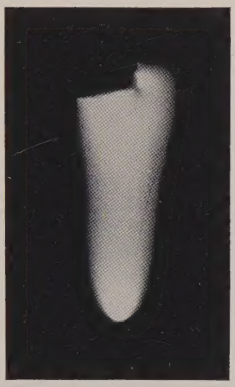

Fig. 4.

Form 3.

l = 3,0 cm
i = 5 Amp.
e = 90 Volt
p = 400 mm N_2
f = 1 : 50
t = ca. 0,03 sec
Hauff
ortho-l.-frei

Glimmlicht.

l = 2,0 cm
i = 0,2 Amp.
e = 410 Volt
p = 15 mm N_2
f = 1 : 7,2
t = ca. 0,03 sec
Hauff
ortho-l.-frei

Fig. 5.

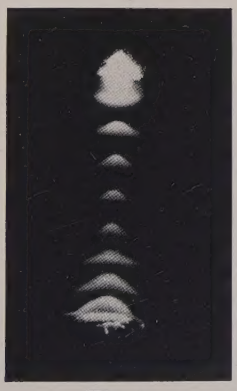

Fig. 6.

Schichtbogen.

l = 2,5 cm
i = 2,1 Amp.
e = 210 Volt
p = 15 mm
Leuchtgas
f = 1 : 9
t = ca. 0,005 sec
Hauff
ortho-l.-frei

W. Frey.

Vita.

Ich, Wilhem Frey von Binningen bei Basel wurde als Sohn des Wilhelm Frey, Kaufmann in Binningen, und dessen Ehefrau Louise, geb. Seiler, am 3. Februar 1889 in Binningen geboren. Nach Absolvierung der Primarschulen von Binningen, Hauenstein, Läufelfingen und der Bezirksschule Olten, besuchte ich vom Sommer 1903 an die Realschule Basel. Im Herbst 1908 verließ ich diese Anstalt mit dem Zeugnis der Reife und immatrikulierte mich im darauffolgenden Wintersemester an der Universität Basel. Im Sommer 1911 erwarb ich mir das Basler Mittellehrerdiplom, um mich hierauf dem Studium der Physik zu widmen. Die vorliegende Arbeit entstand auf Anregung und unter der Leitung meines verehrten Lehrers Herrn Prof. Dr. A. Hagenbach.

Während meiner Studienzeit besuchte ich die Vorlesungen und Praktika der Herren Professoren und Dozenten: A. Hagenbach, L. Bieberbach, Fr. Fichter, R. Flatt, R. Fueter, F. Heman, W. Matthies, H. Rupe, O. Spieß, H. Veillon, K. Von der Mühll, H. Zickendraht.

Nach meinem im Dezember 1915 erfolgten Examen wurde mir von Herrn Prof. Dr. A. Hagenbach die Stelle eines Assistenten am physikalischen Institut angetragen, welches Amt ich dann im Januar 1916 antrat.